大 韓 土 木 學 會 論 文 集
第30卷 第1B號 · 2010年 1月
pp. 33 ~ 40

조석으로 인한 만 내 점착성 부유사 퇴적량 추정 : 수치해석

Estimating the Amounts of Long-term Cohesive Sediment Deposition in Two Tide-dominated Bays of South Korea: Numerical Study

강민구*
Kang, Min Goo

Abstract

In this study, a two-dimensional hydrodynamic and sediment transport modeling system, HSCTM-2D is employed to simulate the amounts of long-term cohesive sediment deposition in two study bays, and its applicability is evaluated. The modeling system's two modules for hydrodynamic modeling and sediment transport modeling are calibrated, comparing the simulated results and the observed tidal levels, tidal current velocities, and suspended sediment concentrations in the Asan and the Cheonsu Bays, South Korea. It is found that there are good agreements between the simulation results and the observed values. The amounts of long-term cohesive sediment deposition of the two study bays are estimated using the modeling system, taking the suspended sediment concentrations from the open ocean in the tide-dominated environment into account. And, in the case of the Asan Bay, the annual deposition rate reaches 8.1 cm/yr; the Cheonsu Bay, 14.5 cm/yr. Overall, it is concluded that the modeling system is useful to understand the physical process of cohesive suspended sediment transport and deposition in tidal water bodies and to establish the mitigation strategy.

Keywords : *cohesive suspended sediment, long-term deposition, two-dimensional numerical modeling, the asan bay, the cheonsu Bay, HSCTM-2D*

요 지

본 연구에서는 조석으로 인한 만에서 부유사 이동과 해저지형변화 예측에 대한 2차원 유사운송모형인 HSCTM-2D 모형의 적용성을 평가하였다. 또한, 보정된 모형을 이용하여 아산만 해역과 천수만 해역에서 점착성 부유사의 유입으로 인한 장기 퇴적량을 추정하였다. HSCTM-2D 모형을 보정하기 위하여 대상해역에 위치한 검조소의 실측조위자료와 모의기간 동안 측정한 유속 및 부유사농도 자료를 모의결과와 비교하였으며, 실측자료와 모의결과가 유사한 경향을 나타내는 것으로 확인되었다. 대상해역의 퇴적환경을 고려하여 외해유입 부유사 농도를 결정하고 장기간의 조석활동에 의한 점착성 부유사의 퇴적량을 추정하였으며, 아산만 해역에서는 연간 퇴적율이 8.1 cm/yr, 천수만 해역에서는 연간 퇴적율이 14.5 cm/yr를 나타냈다. 이와 같은 연구결과로부터 적용된 모델링 시스템이 해역의 점착성 부유사 이동 및 퇴적과정에 대한 이해와 완화대책수립에 유용할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 점착성 부유사, 장기퇴적량, 2차원 수치모델링, 아산만, 천수만, HSCTM-2D

1. 서 론

하구나 연안의 퇴적물은 실트, 점토와 같은 미세한 입자로 구성되어 있으며 점착력을 갖고 있다. 이들은 조석이나 파랑에 의해 외해에서 유입된 부유물, 상류유역으로부터 유입된 토사, 해저나 해안에서 부상한 입자들이며, 대부분 미세하기 때문에 부유사 형태로 이동한다. 부유사는 응집 덩어리를 형성하여 해저에 침강되며, 일시적으로 가라앉은 유사의 일부는 조류속에 의해 침식되어 재부상하여 부유사 상태로 다시 이동하며, 바닥에 남은 입자들은 장기간 압밀되어 퇴적층이 된다. 이와 같은 과정을 거친 부유사의 퇴적량과 퇴적형태는 해역의 조위, 조류속, 유향 등과 같은 수리적 특성으로부터 영향을 받는다. 또한, 장기간 유사퇴적은 해저지형을 변화시켜 항해에 지장을 주고 수질을 오염시키며 해상장비에 손상을 입히는 경우도 있다(서승원, 2004; McAnally *et al*., 2007).

국내의 만이나 하구에서는 간척사업, 매립사업, 교량 및 해안구조물 건설과 같은 대규모 토목사업들이 진행되어 오고 있으며, 이로 인하여 해역의 수리적 특성과 퇴적환경이 변하고 있다(정신택과 조홍연, 1997; 소재귀 등, 1998; 농어촌진흥공사, 1999). 특히, 간척사업은 하구나 만을 가로질러 방조제를 건설하기 때문에 방조제 외측해역에서 조석 특성이 변하게 되므로 해역의 퇴적환경에 미치는 영향이 크다. 또한, 연안해역의 준

*정회원 · 미래자원연구원 연구위원 (E-mail : kmg1218@gmail.com)

설 및 매립은 인접 해역에 부유사를 확산시켜 수질과 생태환경에 영향을 미친다. 이와 같은 해안공사의 영향을 완화시키기 위해서는 공사로 인한 수리특성의 변화와 퇴적 및 생태환경에 미치는 영향을 사전에 파악하여 적절한 대책을 수립할 필요가 있다(정태성 등, 2004; 신범식과 김규한, 2007).

만의 퇴적 및 침식으로 인한 지형변화는 수치모형을 사용하여 대상해역의 환경에서 부유사의 이동 및 퇴적을 모의하여 예측할 수 있다. 수치모형은 대상해역의 퇴적환경을 저비용으로 재현할 수 있으며, 다양한 조건에 대하여 모형을 수립할 수 있기 때문에 해양환경의 변화로 인한 해저지형변화를 예측하는데 많이 사용되고 있다. 부유사 이동 및 퇴적현상은 주로 유한차분법이나 유한요소법과 같은 수치기법을 사용하여 2차원적으로 해석해왔으며, 최근에는 3차원적인 해석을 통하여 점착성 유사의 거동과 이의 영향을 파악하려는 연구들이 시도되고 있다(Hayter, 1983; Nicholson and O'Connor, 1986; Baugh and Littlewood, 2005; Papanicolaou, 2008). 국내에서도 부유사운송모형을 이용하여 낙동강 하구, 아산만 해역, 군산해역, 아산만 해역, 부산해역 등에서 퇴적물이동을 예측한 바가 있다(안수환과 이상화, 1990; 한국해양연구소, 1991; 김재중 등, 1995; 황보윤 2003; 정태성 등, 2004; 서승원, 2004).

본 연구에서는 외해로부터 유입되는 부유사로 인해 발생하는 해저지형변화와 퇴적량을 예측하기 위하여 HSCTM-2D(Hydrodynamics, Sediment, and Contaminant Transport Model) 모형을 사용하였다. HSCTM-2D 모형은 Hayter (1983)에 의해 개발되어 미국 EPA에서 보급하고 있으며, 하구 및 만의 부유사 운송 및 지형변화 모의에 주로 적용되고 있다(U.S. EPA, 1995; Martin and McCutcheon, 1998). 본 연구에서는 아산만 해역과 천수만 해역에서 조석으로 인한 점착성 부유사운송과 퇴적과정을 파악하기 위하여 HSCTM-2D모형을 선정하였다. 모형은 대상 해역 내에 위치한 검조소의 실측조위, 조류속 및 부유사농도 측정자료와 모의결과를 비교하여 보정되었다. 또한, 보정된 모형을 이용하여 조석으로 인한 외해의 부유사유입 및 이동을 고려하여 만의 해저지형변화를 모의하였다.

2. 모형의 개요

2.1 지배방정식 및 수치기법

HSCTM-2D모형에서 해수유동은 식 (1)~(3)의 연속방정식과 운동량방정식을 지배방정식으로 사용하여 모의하며, 해수는 비압축성이며, 수압은 정수압분포를 한다는 가정을 바탕으로 한다(U.S. EPA, 1995).

$$\frac{\partial d}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(u\cdot d)+\frac{\partial}{\partial y}(v\cdot d)=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=-g\frac{\partial d}{\partial x}-g\frac{\partial z_b}{\partial x}+\Omega v+\frac{1}{\rho d}\left[\frac{\partial}{\partial x}(d\tau_{xx})+\frac{\partial}{\partial y}(d\tau_{xy})+\tau_x^s-\tau_x^b\right] \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}=-g\frac{\partial d}{\partial y}-g\frac{dz_b}{\partial y}+\Omega u+\frac{1}{\rho d}\left[\frac{\partial}{\partial x}(d\tau_{yx})+\frac{\partial}{\partial y}(d\tau_{xy})+\tau_y^s-\tau_y^b\right] \tag{3}$$

여기서, d는 수심, u와 v는 각각 x, y 방향 유속, g는 중력가속도, z_b는 바닥표고, ρ는 해수밀도, Ω는 코리올리계수, τ_x^s와 τ_y^s는 각각 x, y 방향의 바람전단응력, τ_x^b와 τ_y^b는 각각 x, y 방향의 바닥마찰응력을 나타내며, τ_{xx}, τ_{xy}, τ_{yx}, τ_{yy}는 각 방향에 대한 수심평균 난류전단응력을 나타내며, Boussinesq의 와점성 모형을 이용하여 산정한다.

해수유동에 의한 퇴적물 운송을 모의하기 위한 점착성 유사운송모형의 이류-확산 방정식은 식 (4)와 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t}+u\frac{\partial C}{\partial x}+v\frac{\partial C}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left[D_{xx}\frac{\partial C}{\partial x}+D_{xy}\frac{\partial C}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[D_{yx}\frac{\partial C}{\partial x}+D_{yy}\frac{\partial C}{\partial y}\right]+S_T \tag{4}$$

여기서, D_{xx}, D_{xy}, D_{yx}, D_{yy}는 각 방향별 와확산계수, C는 부유사 농도를 나타낸다. S_T는 생성 및 소멸항을 나타내며, 식 (5)와 같다.

$$S_T=\left.\frac{dC}{dt}\right|_e+\left.\frac{dC}{dt}\right|_d+S_L \tag{5}$$

여기서, $\left.\frac{dC}{dt}\right|_e$는 바닥으로부터 침식되어 부상하는 생성항, $\left.\frac{dC}{dt}\right|_d$는 퇴적으로 인한 소멸항, S_L은 준설 등으로 인한 부유사 발생량을 나타낸다. 점성토의 퇴적 및 침식현상은 해저에 작용하는 해수의 전단응력에 좌우되며, 전단응력이 퇴적 및 침식한계전단응력에 도달하면 퇴적이나 침식이 발생하게 된다.

HSCTM-2D 모형은 전술한 것과 같은 연속방정식, 운동량 방정식, 이류-확산 방정식으로 구성된 지배방정식에 유한요소법을 적용하여 이산화한 수치모형이다. 유한요소법을 적용하기 때문에 비구조적인 격자들을 사용할 수 있으며, 대상영역에 대한 격자망을 현실성있게 구축할 수 있다. 본 모형은 해수유동 부모형인 HYDRO2D와 점착성 유사운송 부모형인 CS2D로 구성되어 있으며, 이들을 semi-coupling하여 유사이송 및 해저지형변화를 모의한다.

2.2 경계조건

1) 해수면과 바닥경계조건

바람의 영향은 고려하지 않으므로 해수면에서 마찰응력은 무시했으며, 바닥경계면에서 마찰응력은 식 (6)과 같다.

$$\tau_x^b=\frac{gu}{C_z^2d}(u^2+v^2)^{1/2};\ \tau_y^b=\frac{gv}{C_z^2d}(u^2+v^2)^{1/2} \tag{6}$$

여기서, C_z는 Chezy의 마찰계수를 나타낸다.

2) 개방경계 및 폐경계

개방경계조건으로는 외해와 경계면에서 계산시간별 조위값을 격자점마다 지정해주며, 측벽의 폐경계는 유속을 인접한 경계면과 평행하게 하는 slip 조건을 적용하였다. HSCTM-2D 모형에서는 부유사농도를 경계면에서 시간별로 입력하여 사용하나 본 연구에서는 개방경계의 부유사농도는 부유물이 조석과 함께 만의 안쪽으로 유입되는 창조시에는 일정한 농도를 사용하고, 부유물이 조석과 함께 만의 밖으로 유출되는 낙조시에는 식 (7)과 같은 외삽농도경계조건을 사용하였다.

$$\frac{\partial C}{\partial t}=-u\frac{\partial C}{\partial x};\ \frac{\partial C}{\partial t}=-v\frac{\partial C}{\partial y} \tag{7}$$

3. 대상해역

3.1 해역의 범위

HSCTM-2D 모형을 사용하여 국내의 만에서 조석으로 인한 점착성 부유사 운송과 퇴적과정을 파악하고 퇴적량을 추

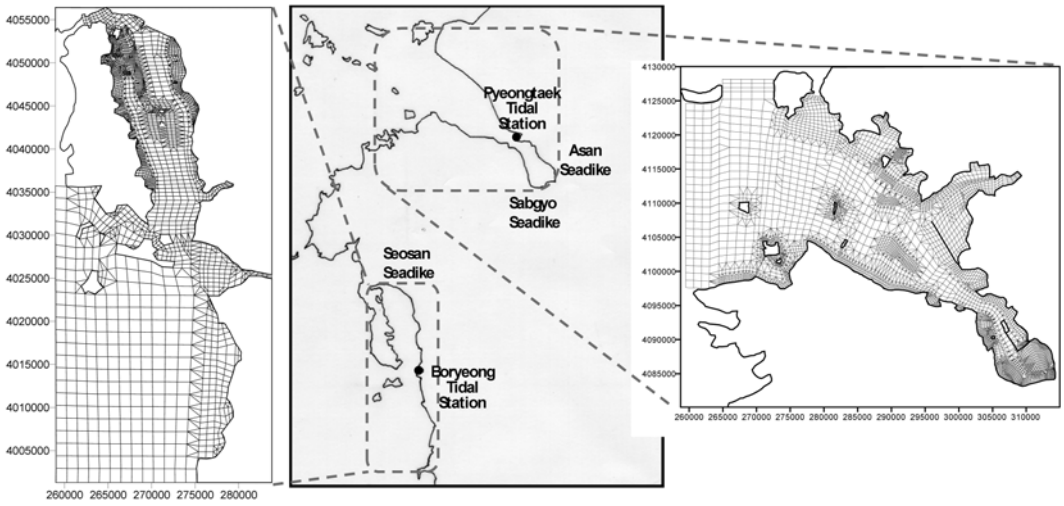

그림 1. 대상 해역의 위치 및 계산 격자망

정하기 위하여 대상해역으로 아산만 해역과 천수만 해역을 선정하였다. 아산만 해역은 그림 1과 같이 삽교방조제, 아산방조제, 대호 방조제를 포함하는 해역으로 면적은 약 1,080 정도이다. 대상 해역의 수로 수심은 5~40 m 정도이며, 만 안쪽은 대부분 저조시 노출되는 간석지로 구성되어 있다. 천수만 해역은 그림 1과 같이 북쪽에 서산 방조제가 위치하고 있으며, 해역의 면적은 약 770 정도이다. 해역의 수로 수심은 10~30 m 정도이며, 만 입구에서 최대수심을 나타낸다. 두 해역의 말단에는 하천의 흐름을 막아 건설된 방조제들이 위치하고 있으며, 이들은 건설된 후 수년이 경과하여 방조제 전방에 새로운 갯벌이 형성된 상태이다. 따라서 외해에서 유입된 점착성 유사로 인해 발생하는 해저지형변화를 연구하는데 적절한 퇴적환경을 갖춘 것으로 판단되어 두 곳을 대상해역으로 선정하였다.

3.2 조석 특징

아산만 해역의 조석은 반일주조형으로 일조부등이 적으며, 평택항에서 대조차는 8.60 m, 평균고조간격은 약 4시간 22분으로 인천항보다 빠르다. 아산만 해역의 조류는 반일주조형으로 1일 2회의 창·낙조류가 일어나며, 평균대조기에 만 입구에서 창조류의 최강유속은 1.32 m/sec에 달하며, 낙조류의 최강유속은 1.44 m/sec에 이른다. 아산방조제와 삽교방조제에 이르는 수로에서 평균대조기에 창조류의 최강유속은 0.64 m/sec에 달하며, 낙조류의 최강유속은 0.76 m/sec에 달한다. 천수만 해역의 조석은 반일주조의 조석이 강하고 일조부등이 비교적 작은 경향을 나타낸다. 만 입구에 위치한 보령항에서 평균고조간격은 3시간 정도이며 대조차는 7.0 m, 소조차는 5.2 m이다. 천수만 해역의 평균대조기 최강창조류의 유속은 만 입구에서 1.75 m/sec, 북쪽의 서산방조제 부근에서 0.46 m/sec 2 m/내며, 최강낙조류의 유속은 만 입구에서 1.54 m/sec, 북쪽의 서산방조제 부근에서 0.41 m/sec의 유속을 나타낸다(이석우, 1994; 농업기반공사, 2002). 이와 같은 조석의 영향으로 인해 두 해역에서는 폭이 좁은 곳에서 빠른 조류속과 침식 성향을 나타내며, 만의 말단에서 상대적으로 느린 유속과 퇴적성향을 나타낸다.

3.3 퇴적층의 물리적 특징

아산만 해역의 퇴적층에서 깊이별로 채취한 시료를 분석한 결과, 비중은 2.619~2.678, 습윤밀도는 1.742~1.791 t/m^3, 함수비는 32.4~67.8%의 범위를 나타냈다. 또한, 퇴적층 시료의 입도분포를 분석한 결과, 퇴적층의 조성이 점토와 실트로 구성된 것으로 나타났다. 천수만 해역의 퇴적층에서 깊이별로 채취한 시료를 분석한 결과, 비중은 2.569~2.687, 습윤밀도는 1.710~1.938 t/m^3, 함수비는 23.9~49.6%의 범위를 나타냈다. 이들 사료의 입도분포를 분석한 결과, 퇴적층의 조성이 점토와 실트인 것으로 나타났다(농업기반공사, 2002). 이와 같은 시험결과는 대상 해역의 퇴적층이 주로 부유사의 침강 및 퇴적에 의한 것임을 나타내는 것으로 판단된다.

4. 모형의 적용

4.1 계산영역 및 계산격자망

모형을 적용하기 위한 계산영역은 개방경계 조위자료, 부유물 농도자료, 모형 보정 자료 등의 수집 용이성을 고려하여 선정하였다. 아산만 해역과 천수만 해역에는 각각 국립해양조사원에서 운영하는 평택검조소와 보령검조소가 위치하고 있으며, 이곳에서 측정한 조위자료를 사용하여 모형을 보정할 수 있다. 각 모형의 외해경계조건은 한국해양연구원에서 제공한 주요지점의 조석모의자료를 사용할 수 있다. 국립수산과학원에서는 아산만 해역의 대호방조제 전방, 자월도와 영흥도 부근과 천수만 해역의 태안연안 및 보령연안에서 매년 2월, 5월, 8월, 11월에 주기적으로 부유물 농도를 측정하고 있으므로 이를 외해 부유사 농도경계로 사용할 수 있다. 이와 같은 여건을 고려하여 그림 1과 같이 각 해역의 계산영역을 설정하였다.

계산격자망은 사각형 요소와 삼각형 요소를 혼용하여 사용하였으며 조간대가 형성되어 있는 해역에서는 조간대 모의시 유속의 불연속을 방지하기 위하여 격자망을 조밀하게 구성하였으며, 주수로가 있는 해역에서는 계산시간을 줄이기 위하여 격자망을 성기게 구성하였다. 그림 1의 우측에 있는 아산만 해역의 격자망은 총 14,015개의 절점과 5,125개의 요소로 구성되었으며, 조간대가 발달한 남양만 지역, 아산방

조제와 삽교방조제, 대호방조제 전방, 제부도 부근에서 격자망을 조밀하게 구성하였다. 그림 1의 좌측에 위치한 천수만 해역의 격자망을 나타낸 것으로 총 8,689개의 절점과 2,777개의 요소로 구성되었으며, 조간대가 발달한 황도와 대주부근에서 격자망을 조밀하게 구성하였다.

4.2 모형의 보정

1) 아산만 해역 모형

아산만 해역 모형의 해수유동모의에 대한 검정은 평택검조소에서 측정한 시간별 조위자료와 모의결과와 비교하여 실시하였으며, 유사운송모의에 대한 검정은 모의기간 중 측정한 22개 지점의 유속 및 부유사농도자료를 모의결과와 비교하여 실시하였다. 아산만 해역 모형의 검정을 위하여 그림 2와 같은 측정지점에서 유속과 부유사 농도를 측정하였다. 아산만 해역에서는 2000년 12월 27일 08:00~16:00에 22개 지점에서 각 시간별로 측점의 위치, 수심, 유속, 부유사 농도, 염분의 농도, 수온 등의 자료를 측정하였다. 측정지점의 위치는 휴대용 GPS 수신기를 이용하여 측정하였으며, 수심은 휴대용 음파 측심기를 사용하여 측정하였다. 유속은 부유사를 측정한 지점에서 프로펠러 유속계를 이용하여 각 지점별로 3~4개의 서로 다른 수심에서 측정하였으며, 각 수심에서 부유사 농도조사를 위한 시료를 채취하였으며, 여과법을 이용하여 부유사량과 부유사농도를 산정하였다. 염분농도는

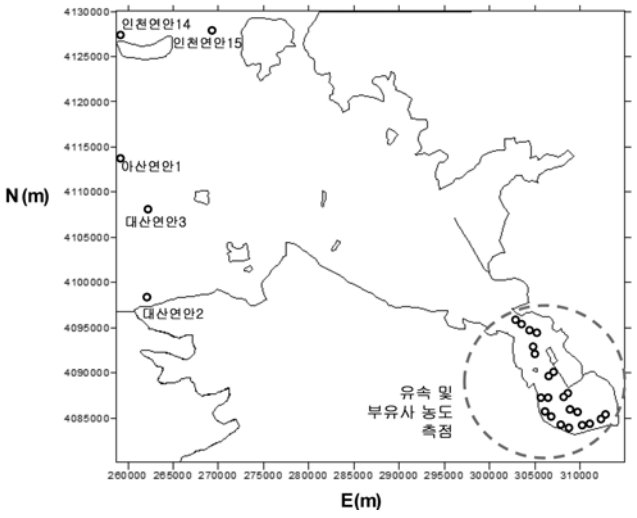

그림 2. 아산만 해역의 유속 및 부유사농도측점과 경계부근의 부유사농도측점

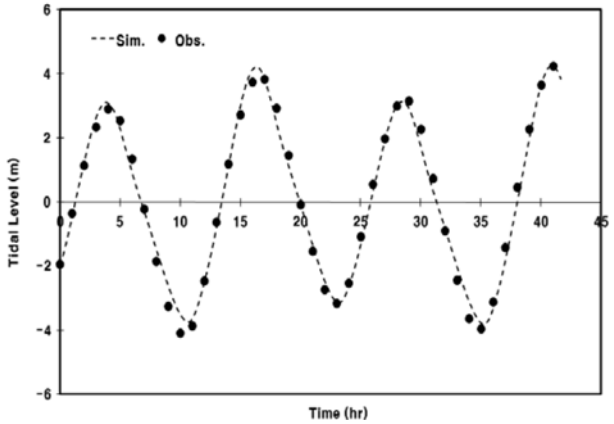

그림 3. 평택검조소 실측조위와 모의결과 비교

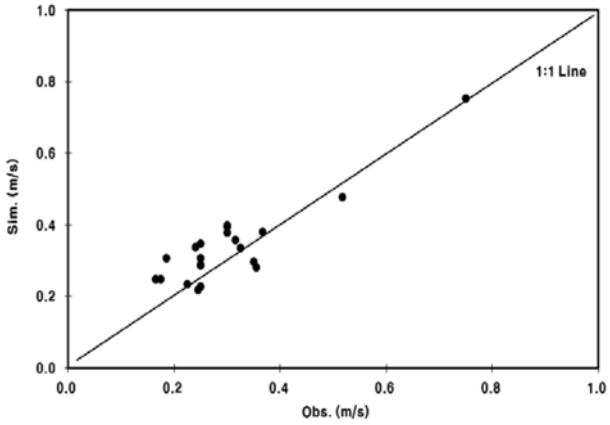

그림 4. 아산만 해역의 유속측정 자료와 모의결과 비교

휴대용 염분농도측정기를 이용하여 수온과 함께 측정하였다.

아산만 해역 모형의 구동의 시간간격은 대상해역의 흐름특성을 고려하여 0.033시간으로 하였으며, 조도계수(n)은 0.03이며, 실측치와 모의치 사이의 RMSE와 R^2의 비교를 통하여 모의결과를 평가하였다. 부유사농도모의를 위한 초기농도는 모형보정을 위한 모의기간이 겨울철인 점과 외해부유사 농도 경계조건을 고려하여 50 mg/L를 사용하였다. 그림 3은 평택검조소의 실측 조위자료와 모의결과를 비교한 것으로 모의치와 실측치가 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한, 실측치와 모의치 간의 RMSE는 0.30 m, R^2는 0.987로 비교적 정확한 예측결과를 나타냈다. 그림 4는 부유사 샘플링 지점에서 측정한 유속자료와 모의결과를 1:1 그래프로 비교한 것이다. 각 지점의 실측유속과 모의유속 사이의 R^2는 0.81, RMSE는 0.07 m/sec이며, 모의치가 실측치보다 다소 큰 경향을 나타냈다. 그림 5-(a)와 (b)/sec이며, 모형의 창조와 낙조 4조류속 벡터도를 나타낸 것이다. 창조시와 낙조 4강한 유속분포를 보t/s곳은 한진각과 노미각 부근, 평택항 공사장 부근, 대호방조 전방의 대란지도와 풍도 사이, 화옹방조제 끝막이 구간 등으로 흐름이 폭이 좁은 곳을 통과할 때 빠른 유속이 발생하는 경향을 나타내고 있다. 또한, 아산만 내측으로 갈수록 유속이 작아지며, 해안 부근에서 다른 지역들 보다 상대적으로 작은 유속을 나타내고 있다.

외해 농도경계는 대상 해역의 개방경계 부근에서 국립수산과학원에서 매년 2월, 5월, 8월, 11월에 주기적으로 측정한 부유물 농도 자료를 사용하였다. 표 1은 1997년~2002년에 그림 2에 나타낸 것과 같이 아산만 해역의 경계 부근의 주요지점에서 측정한 자료를 분석한 결과이다. 분석기간 동안 측정지점들의 여름철(8월) 부유물 농도는 3.0~54.2 mg/L의 범위를 나타냈으며, 평균농도는 21.3 mg/L, 표준편차는 15.7 mg/L이다. 겨울철(2월)의 부유물 농도는 18.2~103.0 mg/L의 범위를 나타냈으며, 평균농도는 43.3 mg/L, 표준편차는 24.6 mg/L이다(국립수산과학원, 2009). 여름철과 겨울철의 부유물 농도 분포를 비교해 보면, 겨울철의 부유물 농도가 여름철 부유물 농도보다 상대적으로 크며, 자료들의 표준편차도 크게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 이들 자료들의 특성을 고려하여 부유물이 조석과 함께 만의 안쪽으로 유입되는 창조시에는 외해 부유사 농도를 여름철 20 mg/L, 겨울철 50 mg/L를 사용하고, 부유물이 조석과 함께 만의 밖으로 유출

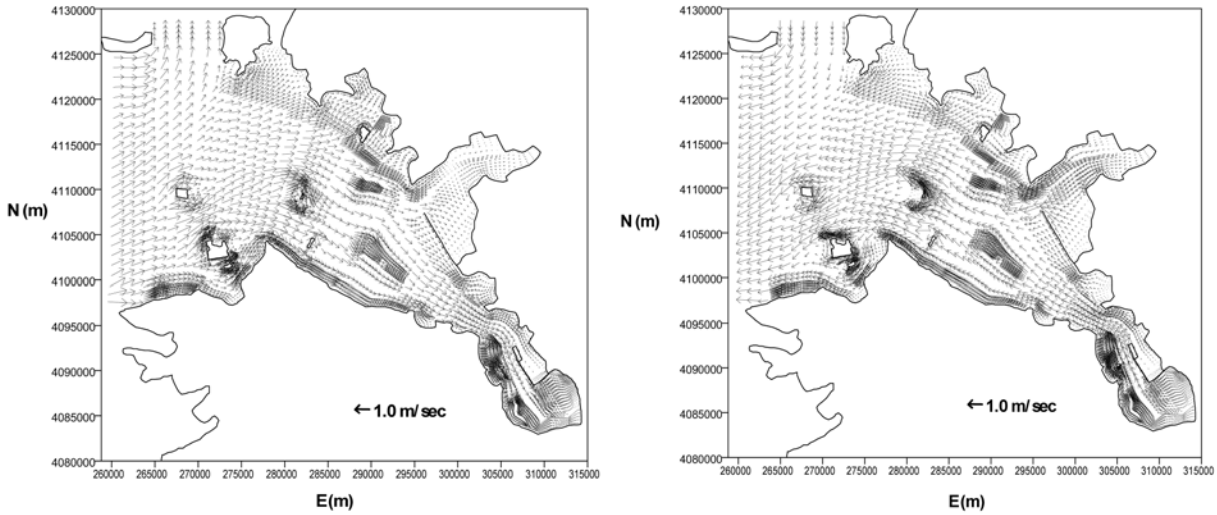

그림 5. 아산만 해역 모형 모의결과(조류속 벡터도)

표 1. 아산만 해역 모형의 주요 측정 지점별 부유물 농도

측정지점	대산연안2[1]		대산연안3[2]		아산연안1[3]		인천항연안14[4]		인천항연안15[5]	
측정시기	2월	8월	2월	8월	2월	8월	2월	8월	2월	8월
1997	71.5	25.8			101.5	53.2	87.0	47.0	103.0	54.2
1998	57.0	21.3			59.7	12.3	59.7	11.3	70.3	4.7
1999	18.8	4.2	56.0	3.0	22.2	4.4	26.6	3.8	23.4	7.6
2000	36.2	37.8	18.2	19.4	32.4	10.8	22.6	33.0	32.4	33.0
2001	40.2	34.4	40.6	20.4	33.4	35.8	44.6	30.4	26.8	8.2
2002	26.2	21.4	34.4	8.2	20.6	9.4	22.8	34.2	25.6	7.2

1) 대산연안 2: 37° 02' 41, 126° 22' 44"; 2) 대산연안 3: 37° 04' 45", 126° 22' 25"; 3) 아산연안 1: 37° 12' 15", 126° 24' 45"; 4) 인천항 연안 14: 37° 17' 48", 126° 17' 00"; 5) 인천항 연안 15: 37° 16' 36", 126° 24' 12"

되는 낙조시에는 식 (7)과 같은 외삽농도경계조건을 사용하였다.

모형에서 대상 해역의 침식 및 퇴적에 영향을 미치는 매개변수는 침강속도, 침식 및 퇴적한계전단응력, 침식률 계수 등이다. 이들은 실험이나 실측을 통하여 결정해야 하지만 해당 해역의 토사를 이용한 실험자료가 없기 때문에 기존의 관련 연구결과들을 바탕으로 결정하였다. 침강속도는 황규남(2000)이 새만금 퇴적층에서 채취한 시료에 대한 침강시험결과를 이용하였다. 퇴적한계전단응력은 과거 연구결과들(Mehta and Partheniades, 1973; 안수환과 이상화, 1990; 김재중 등, 1995)을 바탕으로 0.10 N/m^{2}를 사용하였다. 침식한계전단응력은 퇴적층의 깊이에 따른 시추퇴적물을 이용한 시험을 통해서 얻을 수 있으나 현장재현이 어려우므로 모형의 정성적인 보정이나 과거 연구자료에 의존하게 된다. 본 연구에서 적용한 퇴적층 깊이별 전단강도와 건조단위중량은 한국해양연구소(1990)가 부산 인공섬 건설에 따른 퇴적물 이동 연구에서 적용한 값을 바탕으로 하여 퇴적층 깊이별로 전단강도와 건조단위 중량을 달리하여 22개 측정지점의 부유물 농도자료와 모의값을 비교하면서 보정하였다. 그림 6은 부유사농도 실측치와 모의치를 1:1 그래프로 비교한 것이며, 실측치와 모의치 사이의 R^2는 0.84, RMSE는 7.5 mg/L로서 모의치와 실측치가 유사한 경향을 나타내고 있다.

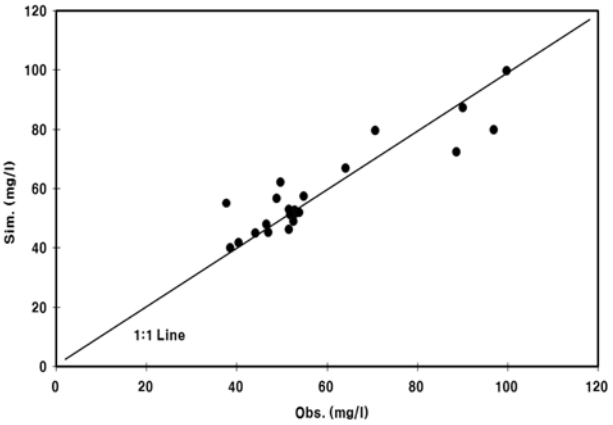

그림 6. 아산만 해역의 부유사농도 실측치와 모의결과 비교

2) 천수만 해역 모형

천수만 해역 모형의 해수유동모의에 대한 검정은 보령검조소에서 측정한 시간별 조위자료와 모의결과를 비교하여 실시하였다. 또한, 유사운송모의에 대한 검정은 천수만 해역에서 2001년 2월 9일 14:00~19:00에 그림 7에 나타낸 14개 지점에서 조류속과 부유사 농도 측정자료와 모의결과를 비교하여 실시하였다. 각 지점에서는 아산만 해역에서와 동일한 방법으로 시간별로 측점의 위치, 수심, 유속, 부유사 농도, 염분의 농도, 수온 등의 자료를 측정하였다.

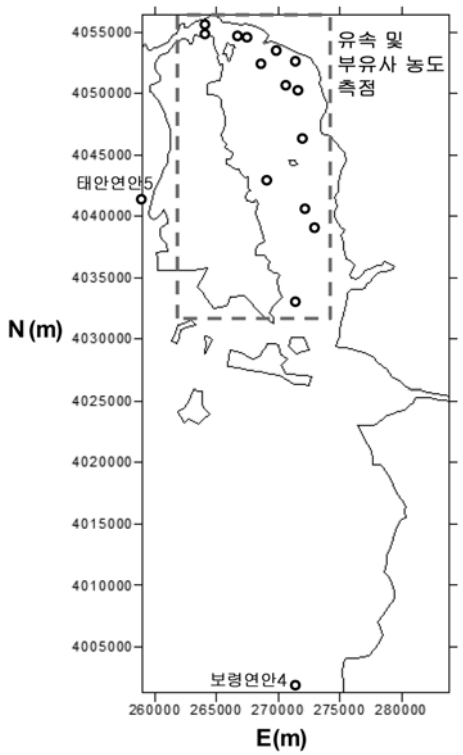

그림 7. 천수만 해역의 유속 및 부유사농도측점과 경계부근의 부유사농도측점

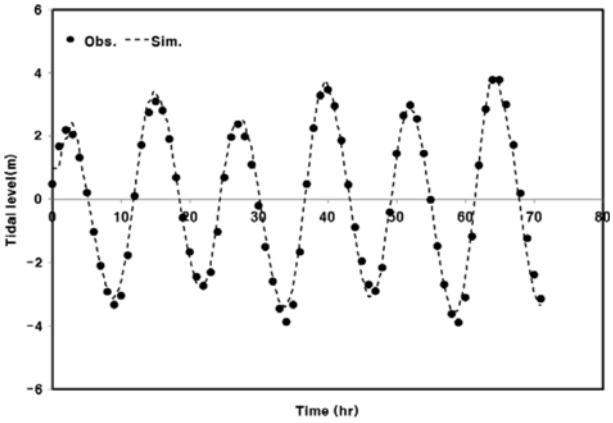

그림 8. 보령검조소의 실측조위와 모의결과 비교

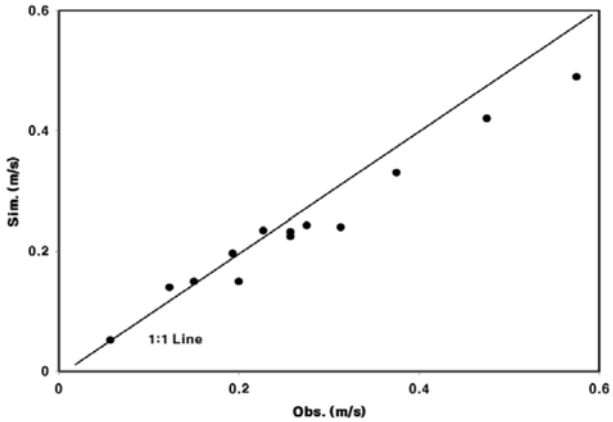

그림 9. 천수만 해역의 유속 측정자료와 모의결과 비교

천수만 해역 모형의 구동의 시간간격은 대상해역의 흐름특성을 고려하여 0.033시간으로 하였으며, 조도계수(n)은 0.028이며, 실측치와 모의치 사이의 RMSE와 R^2의 비교를 통하여 모의결과를 평가하였다. 부유사농도모의를 위한 초기농도는 모형보정을 위한 모의기간이 겨울철인 점과 외해부유사농도 경계조건을 고려하여 40 mg/L를 사용하였다. 그림 8은 보령검조소의 실측 조위자료와 모의결과를 비교한 것으

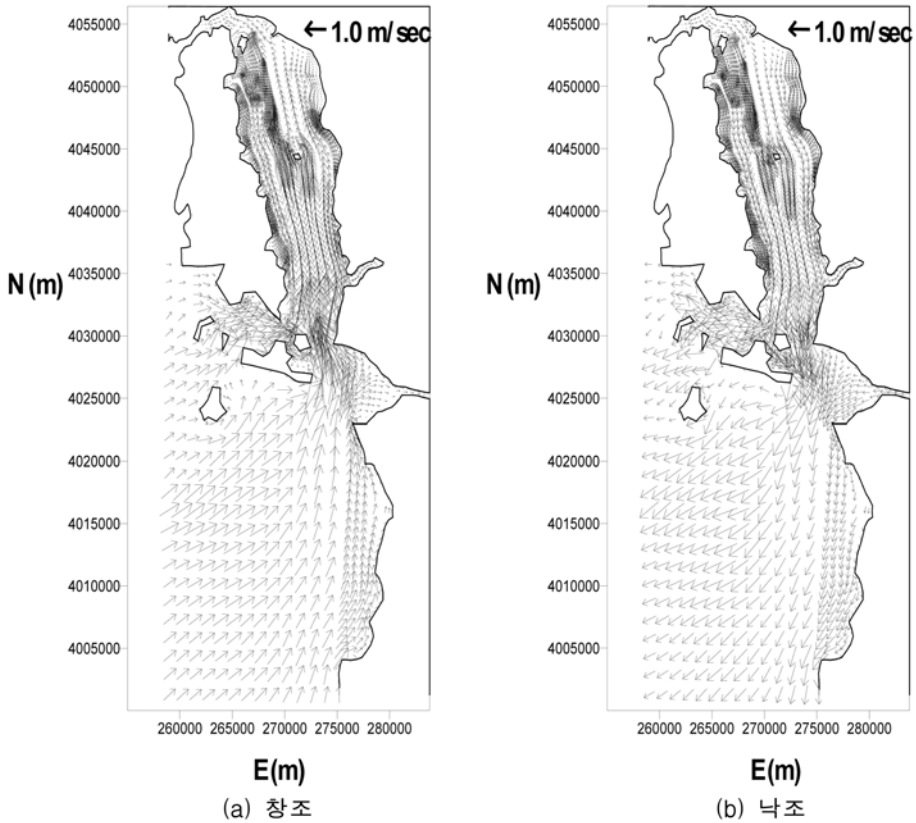

그림 10. 천수만 해역 모형 모의결과(조류속 벡터도)

로 모의치와 실측치가 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한, 실측치와 모의치 사이의 RMSE는 0.28 m, R^2는 0.987로 비교적 정확한 예측결과를 나타냈다. 그림 9는 부유사 샘플링 지점에서 측정한 유속자료와 모의결과를 1:1 그래프로 비교한 것이다. 각 지점의 실측유속과 모의유속간의 R^2는 0.97, RMSE는 0.05 m/sec이며, 유속이 작은 지점에서는 실측치와 모의치가 잘 일치하고 있으나, 유속이 큰 지점에서는 모의치가 실측치보다 다소 작은 경향을 나타내고 있다. 그림 10-(a)와 (b)는 천수만 해역의 창조 및 낙조시 조류속 벡터도를 각각 나타낸 것이다. 창조시와 낙조시 강한 유속분포를 보이는 곳은 천수만의 입구인 원산도와 영목 사이, 효자도와 송학도 사이에서 가장 큰 유속을 나타낸다. 창조시나 낙조시에 만의 입구에서 북쪽으로 들어갈수록 작은 유속을 나타낸다.

모형의 외해 농도경계는 국립수산과학원에서 매년 2월, 5월, 8월, 11월에 주기적으로 측정하고 있는 태안연안 5와 보령연안 4 관측지점의 부유물농도로 고려하여 설정하였다. 1997년~2002년에 그림 7에 나타낸 천수만 해역의 경계 부근의 주요지점에서 측정한 자료를 분석한 결과, 측정지점들의 부유물 농도는 여름철(8월)에 2.8~38.0 mg/L의 범위를 나타냈으며, 평균농도는 13.2 mg/L, 표준편차는 10.9 mg/L이다. 겨울철(2월)에 측정지점들의 부유물농도는 10.8~54.3 mg/L의 범위를 나타냈으며, 평균농도는 28.4 mg/L, 표준편차는 19.1 mg/L이다(국립수산과학원, 2009). 여름철과 겨울철의 부유물농도 분포를 비교해 보면, 겨울철의 부유물 농도가 여름철 부유물농도보다 상대적으로 크며, 자료들의 표준편차도 크게 나타났으며, 이는 아산만 해역과 유사한 특성이다. 따라서 부유물농도 자료의 특성을 고려하여 부유물이 조석과 함께 만의 안쪽으로 유입되는 창조시에는 부유사 농도 경계조건으로 여름철 20 mg/L, 겨울철 40 mg/L를 사용하고, 부유물이 조석과 함께 만의 밖으로 유출되는 낙조시에는 식 (7)과 같은 외삽농도경계조건을 사용하였다.

천수만 해역 모형에 적용된 침강속도는 아산만 모형과 동일한 방법을 사용하여 산정하였으며, 퇴적한계전단응력으로 0.10 N/m^2를 사용하였다. 퇴적층 깊이별 전단강도와 건조단위중량은 아산만 해역 모형의 보정에 사용한 방법과 같이 14개 측정지점의 부유물 농도자료와 모의결과를 비교하면서 보정하였다. 그림 11은 부유사농도 실측치와 모의치를 1:1 그래프로 비교한 것이며, 실측치와 모의치 간의 R^2는 0.85, RMSE는 4.3 mg/L로서 모의치와 실측치가 유사한 경향을 나타내고 있다.

표 2. 천수만 해역 모형의 주요 지점별 부유물 농도

측정지점	태안연안5[1]		보령연안4[2]	
측정시기	2월	8월	2월	8월
1997	49.5	30.0	54.3	38.0
1998	53.7	9.0	52.7	6.7
1999	15.2	5.0	11.8	2.8
2000	11.0	13.6	18.6	4.4
2001	14.0	5.2	36.4	18.0
2002	12.6	10.8	10.8	15.0

1) 태안연안 5: 36° 29' 12", 126° 17' 18"; 2) 보령연안 4: 36° 11' 16", 126° 27' 58"

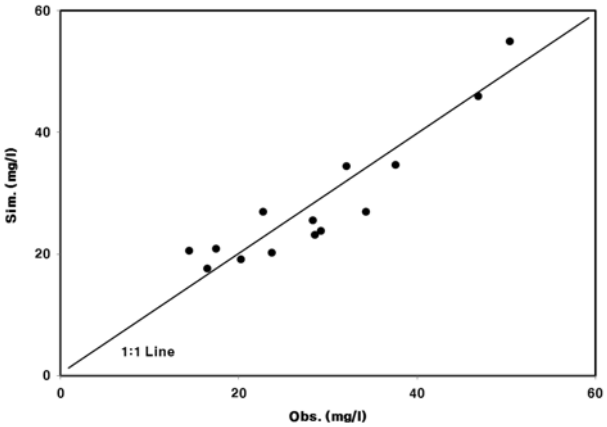

그림 11. 천수만 해역의 부유사농도 실측치 와 모의결과 비교

5. 장기 퇴적량 추정

5.1 아산만해역

아산만 해역의 장기간 지형변화를 모의하기 위하여 외해에서 유입되는 부유물의 농도를 표 3에 나타낸 것과 같이 20 mg/L와 50 mg/L인 기간으로 구분하였다. 외해농도가 20 mg/L인 시기에 대상해역 내에 퇴적되는 양은 $39,592\times10^3$ m^3으로 나타났으며, 외해농도가 50 mg/L인 시기에 해역 내에 퇴적되는 양은 $47,701\times10^3$ m^3으로 나타났다. 연간 퇴적율은 외해농도가 20 mg/L인 시기와 50 mg/L인 시기에 각각 3.7 cm/yr, 4.4 cm/yr이었으며, 연간 퇴적율은 8.1 cm/yr를 나타냈다. 모의결과는 아산만 해역에서 퇴적이 주로 이뤄지는 곳은 남양만 내측, 남양호 전방, 아산방조제 전방, 대호방조제 전방 부근으로 나타났다. 또한, 침식이 주로 이뤄지는 곳은 평택항 부근, 대호방조제 전방의 대란지도와 풍도 사이 등이었으며, 이곳에서는 강한 조류속에 의해 원지반이 침식되는 것으로 판단된다.

5.2 천수만 해역

천수만 해역의 장기간 지형변화를 모의하기 위하여 외해에서 유입되는 부유물의 농도를 표 3에 나타낸 것과 같이 20 mg/L과 40 mg/L인 기간으로 구분하였다. 외해농도가 20 mg/L인 경우에 대상해역 내에 퇴적되는 양은 $49,441\times10^3$ m^3으로 나타났으며, 40 mg/L인 경우에 대상해역 내에 퇴적되는 양은 $61,038\times10^3$ m^3으로 나타났다. 연간 퇴적율은 외해농도가 20 mg/L인 경우에 6.5 cm/yr, 40 mg/L인 경우에

표 3. 대상 해역별 퇴적량 및 퇴적율 모의 결과

대상 해역	외해농도 (mg/L)	퇴적량 (10^3m^3/yr)	퇴적율 (cm/yr)
아산만	20	39,592	3.7
	50	47,701	4.4
	합계	87,293	8.1
천수만	20	49,441	6.5
	40	61,038	8.0
	합계	110,479	14.5

8.0 cm/yr 이며, 연간 퇴적율은 14.5 cm/yr를 나타냈다. 모의결과는 천수만 해역에서 퇴적이 주로 이뤄지는 곳은 원산도와 삽시도 사이, 대천항 부근, 죽도와 대주 부근으로 나타났다. 또한, 천수만 해역에서 침식이 주로 이뤄지는 곳은 천수만의 입구인 원산도와 영목 사이, 효자도와 송학도 사이로서 강한 유속에 의해 원지반이 침식되는 결과를 나타냈다.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 아산만 해역과 천수만 해역의 점착성 부유사 퇴적환경을 파악하고 장기간 퇴적량을 추정하기 위하여 대상 해역의 해양환경을 조사 및 분석하였다. 또한, 2차원 유사운송모형인 HSCTM-2D 모형을 이용하여 대상 해역에서 조석으로 인한 점착성 부유사 운송 및 퇴적과정을 재현하였다. 그리고 보정된 모형을 이용하여 대상 해역에서 점착성 부유사의 장기 퇴적량을 추정하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. HSCTM-2D 모형의 해수유동 부모형을 보정한 결과를 살펴보면, 아산만 해역의 경우에 평택검조소의 실측조위자료 모의결과 사이에 RMSE는 0.30 m, R^2는 0.987, 대상 기간동안 22개 지점에서 측정한 유속자료와 모의결과 사이의 R^2는 0.81, RMSE는 0.07 m/sec을 나타냈다. 천수만 해역의 경우에는 보령검조소의 실측조위자료와 모의결과 사이의 RMSE가 0.28 m, R^2는 0.987, 대상 기간동안 14개 지점에서 측정한 유속자료와 모의결과 사이의 R^2는 0.97, RMSE는 0.05 m/sec를 나타냈다.
2. HSCTM-2D 모형의 유사이동 부모형의 보정한 결과를 살펴보면, 아산만 해역의 경우에 22개 측정지점의 부유사 농도 실측자료와 모의결과들 사이에 R^2는 0.84, RMSE는 7.7 mg/L를 나타냈다. 천수만 해역의 경우에는 14개 측정지점의 부유사 농도 실측자료와 모의결과를 사이에 R^2는 0.85, RMSE는 4.3 mg/L를 나타냈다.
3. 아산만의 연간 퇴적량을 추정하기 위하여 외해에서 유입되는 부유물 농도를 20 mg/L와 50 mg/L로 구분하여 모의한 결과, 각각 3.7 cm/yr와 4.4 cm/yr로 연간퇴적율은 8.1 cm/yr를 나타냈다. 천수만의 연간 퇴적량을 추정하기 위하여 외해에서 유입되는 부유물 농도를 20 mg/L와 40 mg/L로 구분하여 모의한 결과, 각각 6.5 cm/yr과 8.0 cm/yr로 연간퇴적율은 14.5 cm/yr를 나타냈다.

본 연구결과는 대상 해역에 대한 이해를 증진시키고, 해상공사와 같은 인위적인 영향으로 인한 피해를 완화시키기 위한 대책수립에 기여할 것으로 사료된다. 또한, 대상 해역의 퇴적환경의 변화는 생태환경에 영향을 미치므로 이들의 상호작용을 파악하기 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

국립수산과학원(2009) **한국해양환경조사자료** <http://portal.nfrdi.re.kr/envirodata>.

김재중, 김기철, 이정만(1995) 낙동강 하구에서의 부유사 거동에 관한 연구, **한국해양공학회지**, 한국해양공학회, 제9권, 제1호, pp. 120-131.

농업기반공사(2002) **방조제 축조 전후의 외측 해저지형변화 조사 분석 및 서남해안 간척실적 조사 연구**.

농어촌진흥공사 농어촌연구원(1999) **방조제 축조후 연안의 해저지형과 퇴적환경 변화 연구(최종)**.

서승원(2004) 금강하구 퇴적변화 및 통행지장에 관한 후측모의, **한국해안 · 해양공학회지**, 한국해안 · 해양공학회, 제16권, 제4호, pp. 224-232.

소재귀, 정경태, 채장원(1998) 천수만 방조제 건설로 인한 조석현상변화, **한국해안 · 해양공학회지**, 한국해안 · 해양공학회, 제10권, 제4호, pp. 151-164.

신범식, 김규한(2007) 생태계 모델을 이용한 갯벌의 수질정화능력 산정, **한국해양공학회지**, 한국해양공학회, 제21권, 제2호, pp. 42-49.

안수한, 이상화(1990) 점착성 부유사의 이동에 관한 수치모형, **한국수문학회지**, 한국수문학회, 제23권, 제1호, pp. 119-127.

이석우(1994) **한국항만수리지**, 집문당.

정신택, 조홍연(1997) 인천해역개발에 따른 조석변화 및 오염물질 운송 예측, **한국해안 · 해양공학회지**, 한국해안 · 해양공학회, 제9권, 제1호, pp. 1-8.

정태성, 김태식, 강시환(2004) 준설공사시 부유사 확산 예측시스템의 개발, **한국해안 · 해양공학회지**, 한국해안 · 해양공학회, 제16권, 제1호, pp. 47-55.

한국해양연구소(1991) **부산 인공섬 건설에 따른 퇴적물 이동 연구(II)**.

황규남(2000) 새만금 갯벌퇴적물의 침강속도 산정을 위한 실험적 연구, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제20권, 제2호, pp. 277-286.

황보윤(2003) **이차원 유사운송모형을 이용한 해저지형변화 예측**, 석사학위논문, 경성대학교.

Baugh, J.V. and Littlewood, M.A. (2005) Development of a cohesive sediment transport model of the Thames Estuary, *Proceedings of Estuarine and Costal Modeling 2005*, pp. 824-841.

Hayter, E.J. and Mehta, A.J. (1986) Modeling cohesive sediment transport in estuarine waters. *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 10, pp. 294-303.

Hayter, E.J. (1983) *Prediction of cohesive sediment movement in estuarial water*, Ph. D. Thesis, University of Florida.

Martin, J.L. and McCutcheon, S.C. (1998) *Hydrodynamics and transport for water quality modeling*, CRC Press, Inc., Florida, USA.

McAnally, W.H., Teeter A., Schoellhamer, D., Friedrichs, C., Hamilton, D., Hayter E., Shrestha, P., Rodriguez, H., Sheremet, A., and Kirby R. (2007) *Management of fluid mud in estuaries, bays, and lakes-: Measurement, modeling, and management*, Journal of Hydraulic engineering, Vol. 133, No. 1, pp. 23-38.

Mehta, A.J. and Partheniades E. (1973) *Depositional behavior of cohesive sediments*, Technical report No. 16: Costal and oceanographic engineering Laboratory, University of Florida, Gainesville, Florida.

Nicholson, J. and O'Connor, B.A. (1986) *Cohesive sediment transport model*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 112, No. 7, pp. 621-640.

Papanicolaou, A.N., Elhakeem M., Prakash, S., and Edinger, J. (2008) *Sediment transport modeling review-current and future developments*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 134, No. 1, pp. 1-14.

U.S. Environmental Protection Agency(EPA) (1995) *HSCTM-2D, a finite element model for depth-averaged hydrodynamics, sediment and contaminant transport*, Georgia, USA.

(접수일: 2009.6.29/심사일: 2009.8.10/심사완료일: 2009.12.29)